

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210925

航天器电源建模仿真综述与展望*

赵光权, 王盟, 刘大同, 陈威铮, 彭喜元

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院 哈尔滨 150080)

摘要:电源系统是航天器上必不可少的重要分系统,用于产生、储存、分配电能。随着航天器数量的爆发式增长,电源系统的建模仿真成为航天器健康管理和智能运维领域的研究热点。鉴于此,本文首先总结了航天器电源的分类、组成及发展趋势。接着,从航天器健康管理和智能运行维护视角,综述了航天器电源建模及仿真技术体系,航天器电源典型部件机理建模、数据驱动建模、数字孪生融合建模方法,航天器电源的仿真技术与仿真软件、建模仿真的典型应用。最后对航天器电源建模仿真的技术挑战及发展趋势进行总结和分析。本文预期能够为航天器电源健康管理、航天器电源建模与仿真、数字孪生领域的研究人员提供一定的参考和借鉴。

关键词: 航天器电源; 机理建模; 数据驱动建模; 数字孪生建模; 电源仿真技术

中图分类号: TP302.1 TH707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Review and perspective survey on spacecraft power supply modeling and simulation

Zhao Guangquan, Wang Meng, Liu Datong, Chen Weizheng, Peng Xiyuan

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The power supply system is an essential subsystem of spacecraft, which is used to generate, store and distribute electric energy. With the explosive growth of the number of spacecraft, the modeling and simulation of power supply has become a research hotspot in the field of spacecraft health management, intelligent operation and maintenance. In view of this, this article firstly summarizes the classification, composition and development trend of spacecraft power supply. Then, from the perspective of spacecraft health management and intelligent operation and maintenance, spacecraft power supply modeling and simulation technology framework, mechanism modeling, data-driven modeling, digital twin fusion modeling method of typical components, spacecraft power supply simulation technology and software, typical application of modeling and simulation are reviewed. Finally, the technical challenges and development trends of spacecraft power supply modeling and simulation are summarized and analyzed. This article is expected to provide some references for researchers in the fields of spacecraft power supply health management, spacecraft power supply modeling and simulation, and digital twins.

Keywords: spacecraft power supply; mechanism modeling; data-driven modeling; digital twin modeling; power supply simulation technology

0 引言

航天器是典型的信息-物理系统(cyber-physical system, CPS),主要包括卫星、深空探测器、空间站、载人飞船等。现代航天器在导航定位、军事侦察、地质勘探、

气象观测等领域发挥着重要的作用,对于科技进步和社会发展具有重要的意义^[1-2]。随着科技的快速发展与太空探索需求的日益扩大,航天器的数量呈现爆发式增长趋势。中科院《创新2050:科技革命与中国的未来》报告中明确指出,未来我国航天器的在轨运行管理任务将出现显著增长^[3]。航天器结构复杂,分系统及部件众多,各

收稿日期:2022-12-28 Received Date: 2022-12-28

* 基金项目:国家自然科学基金(62273120)项目资助

分系统相互交联、相互耦合,工作机理复杂。为保证数量众多的航天器在轨正常工作,航天器健康管理及智能运行维护成为重要研究方向。

电源系统是航天器中产生、储存、调节、变换和分配电能的系统,是航天器的“血液”和“心脏”,负责为航天器各分系统和载荷在轨工作的各阶段提供和调配稳定可靠的电能^[4]。但由于航天器长期在轨运行的特殊性,发生故障后通常难以及时维修,因此电源系统的工作状态直接影响整个航天器的工作状态和任务成败。通过对国内外多起航天器在轨异常与故障的分析,电源系统的故障约占航天器在轨故障的20%~30%^[5]。航天器电源是高度复杂的系统,涉及光、机、电、热诸多领域,目前尚未大规模批量化生产,在“保成功”等现实压力下,航天器电源故障预测和健康管理(prognostics and health management, PHM)研究面临机理不清楚、数据样本不足、实际验证困难等现实问题。由于建模与仿真技术具有置信度高、安全可靠、成本低等先天优势,面向PHM的航天器电源建模与仿真技术获得了越来越多的关注,逐渐成为研究的焦点。

建模与仿真经历了数十年的发展,已成为航天器电源设计、运行维护与健康健康管理的重要手段。建模与仿真的定义是“以相似原理、模型理论、系统技术、领域知识为基础,以计算机系统、物理设备及仿真器为工具,抽象描述已有或设想系统,实现研究、分析、设计、验证与维护的多学科、多物理场交叉的综合技术”^[6-7]。20世纪是建模与仿真技术产生与发展的关键时期,上半叶时期,建模与仿真技术初具雏形;20世纪中叶时期,随着计算机的面世,“仿真”被正式提出^[8];20世纪90年代,该技术被美国国防部进一步更改为“建模与仿真”,旨在强调建模是仿真的重要基础。2007年,美国国防部将建模与仿真定义为“以模型为基础,模拟真实世界过程或系统随时间的运行,以进行管理或技术决策”^[9]。我国的建模与仿真技术从20世纪60年代至今,经历了半实物仿真系统研发、仿真语言开发、可视化技术研究、虚拟样机生产、复杂系统的建模仿真平台开发等不断创新与迭代的过程^[10]。建模与仿真技术依托于计算机技术的飞速发展,已覆盖航空、航天、国防、工业等众多领域,技术趋于多样化、复杂化、全面化,成为一个强有力的工具。

面向健康管理及智能运行维护的航天器电源建模方法主要包括机理建模、数据驱动建模及数字孪生融合建模。其中机理模型注重表达航天器电源不同分系统的工作原理及分系统间的关系;数据驱动建模通过挖掘与提取数据特征建立数学模型并表达系统的运行状态;数字孪生融合建模是近几年的新兴思想,多依赖于数据驱动模型与机理模型的融合实现。针对航天器电源系统的建模与仿真,国内外众多研究机构和学者开展了相关研究。

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) John H. Glenn研究中心对太阳能电池阵的机理建模研究较早,所建立的模型已成功应用于国际空间站,能够准确预测太阳能电池阵的发电能力^[11-12]。Ames研究中心开发了航天器电源系统的高级诊断和预测测试平台(advanced diagnostics and prognostics testbed, ADAPT),以半实物仿真模拟航天器电源系统的运行状态,实现电源系统的诊断预测和健康管理^[13]。随着全数字建模仿真技术的发展,Ames研究中心还开发了全数字ADAPT系统,为电源系统提供高保真系统结构、电路机理仿真建模,可注入实际硬件难以模拟的故障,快速生成仿真故障场景,为健康管理、算法评估、测试诊断等提供依据^[14]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)针对航天器蓄电池的退化建模开展了多项研究^[15]。北京空间飞行器总体设计部归纳总结了航天器电源系统建模基础、要素与典型的建模仿真方法,面向电源系统的总体设计、分析和仿真验证开展研究,并出版专著《航天器电源系统建模与仿真》^[16]。上海空间电源研究所在空间电源技术领域深耕几十年,通过分析空间锂电池数字孪生系统的构成要素,从多个角度出发建立锂电池数字孪生模型,对空间锂电池进行精准状态诊断和预测^[17]。哈尔滨工业大学重点分析了面向复杂系统运行状态评估和预测的数字孪生技术内涵、关键技术,并展望其未来的发展趋势和方向^[18]。

各大研究机构及学者开展的上述相关研究,推动航天器电源建模与仿真技术的发展。但由于航天器电源系统组成复杂,工作机理等效困难,目前尚未见实例化的航天器电源高保真动态建模和仿真系统。尤其是针对在轨航天器电源健康管理及智能运维领域,缺乏相应的体系化建模与仿真研究和关键技术支撑。所建立的电源数字化模型保真度不够,虚实同步困难,距离实用化的航天器电源数字伴飞系统还存在较大差距。鉴于此,本文系统梳理航天器电源的分类、组成及结构,重点分析航天器电源建模与仿真技术体系、主要建模方法与仿真技术,并展望航天器电源建模仿真技术的未来发展趋势与方向。

1 航天器电源概述

随着空间技术的迅猛发展,航天器电源技术也得到了大幅提升,目前已形成系列化产品。

1.1 航天器电源分类

航天器电源已形成一套完整的技术体系,主要包括化学电源、太阳光伏电源、核电源等,其中太阳光伏电源为目前应用最广泛的航天器电源。

1) 化学电源

早期的航天器多采用单一的化学电池供电,如原电

池(锌银电池、硫化钠电池)、燃料电池等。化学电源是一种经济型能源,其中原电池通常为任务期短、功耗低的小型航天器提供电能,其优势是重量轻、成本低^[19]。当在轨任务期达到数周后,燃料电池可作为电能的来源。燃料电池以氢氧燃料电池为主,将化学能转化为电能,为航天器供电,曾主要应用于登月车及航天飞机中。随着航天器任务日益复杂,负载增多导致功耗激增,在轨周期不断延长,化学电源在航天器中的应用逐渐减少。

2) 太阳光伏电源

航天器电源领域最重要的进步之一是将太阳能转化为电能的太阳光伏电源。太阳光伏电源将空间中太阳能转换为电能,实现了航天器的长期在轨运行。目前,90%以上的航天器都采用太阳能电池阵-蓄电池组联合供电电源系统。这种电源系统主要由太阳能电池阵列、电源控制器、储能电池组及使各模块协同工作的元件和总体电路组成^[20]。

3) 核电源

核电源通过小型放射性同位素或核反应堆的核裂变产生能量,可为数百瓦的负载提供稳定的电能^[4]。常见的核电源包括放射性同位素温差发电机、核反应堆温差发电机、热离子反应堆等。核电源具有持续供电、节省空间的优点,通常为长期空间探测或深空探测任务提供能源。

由于绝大多数航天器以太阳光伏电源作为主要的能量来源,因此本文重点针对太阳光伏电源的组成和拓扑结构、建模与仿真技术进行综述。

1.2 航天器电源的组成

太阳能电池阵-蓄电池组联合电源的主要部件包括太阳能电池阵、蓄电池组、电源控制器。其中,太阳能电池阵是供能模块,蓄电池组是储能模块,电源控制器是逻辑控制模块。航天器电源系统的典型组成结构如图 1 所示。

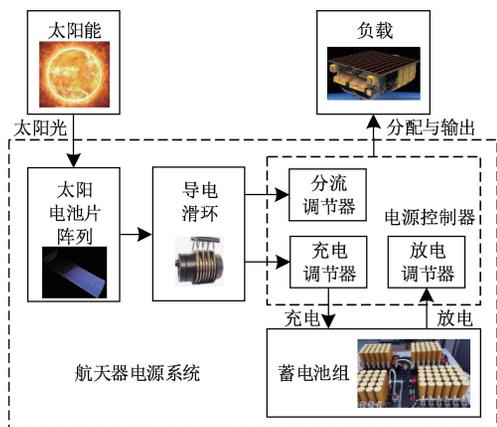


图 1 航天器电源系统的典型组成结构

Fig. 1 Typical structure of the spacecraft power supply system

太阳能电池阵由太阳能电池片阵列和导电滑环组成。太阳能电池片是能量转换机构,负责在光照期为系统供电,向蓄电池组充电,向负载供电,三结砷化镓是太阳能电池阵使用最广泛且最有竞争力的材料之一。导电滑环是对日定向驱动机构,实现航天器与转动的电池片阵列间的转动联结,以避免对日定向时电缆的缠绕。蓄电池组的功能是在地影期向负载供电,航天器电源技术经过不断发展已形成三代空间储能电池^[21],包括镉镍蓄电池^[22]、氢镍蓄电池^[23]、锂离子蓄电池^[24]等;电源控制器又可分为充电调节器、放电调节器、分流调节器等,分别负责控制蓄电池组的充电、放电以及对母线中多余电流的分流工作,稳定母线电压,实现蓄电池组的均衡充电。

1.3 航天器电源的拓扑结构

根据太阳能电池阵到电源系统一次母线的功率传输方式,卫星电源的拓扑结构可以分为直接能量传输方式(direct energy transfer, DET)和串联母线传输方式。其中,DET方式中主要包括顺序开关分流调节(sequential switching shunt regulator, S³R)和串联型顺序开关分流调节(serial sequential switching shunt regulator, S⁴R)^[25]。串联母线传输最典型的应用之一为峰值功率跟踪方式(peak power tracking, PPT)。航天器电源的典型拓扑结构特点如表 1 所示。

表 1 航天器电源典型拓扑结构特点

Table 1 Typical topology characteristics of spacecraft power supply

拓扑结构	能量传输方式	特点	主要应用对象
S ³ R	直接能量传输	电路简单,可靠性高,易批量生产,应用广泛;通过三域的控制,实现母线电压恒定。	GEO 卫星
S ⁴ R	直接能量传输	具备统一的充电域和放电域,太阳能电池阵功率的利用率更高;减轻质量、体积,降低控制逻辑的复杂度。	GEO 卫星和 LEO 卫星
PPT	串联母线传输	具有更高的输出功率和更高的效率;包含串联结构,并联结构,串并联结构。	大功率载荷的 SAR 卫星、LEO 卫星和微小卫星

S³R 通过充电调节域、放电调节域、分流调节域的控制,实现全周期的母线电压恒定。S³R 结构广泛应用于地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星中,如“东方红四号”平台^[19]。S⁴R 结构在 S³R 的基础上增加了一个控制开关,使太阳能电池阵供给母线外的多余功率可直接对蓄电池组充电。S⁴R 结构应用于 GEO 卫星和近地轨道

(low earth orbit, LEO) 卫星,如伽利略系统导航卫星^[26]等。PPT 技术使太阳能电池阵的输出功率始终保持最大。大功率载荷的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星、欧洲大部分 LEO 卫星^[27]及我国部分微小卫星均采用了 PPT 技术,如 2016 年发射的翱翔之星等^[28]。

1.4 航天器电源发展趋势

1) 高集成度

随着空间技术的快速发展,航天器电源系统也进入了发展的快车道。针对月球、火星及地球轨道卫星和探测器,电源系统应具备体积小、集成度高、稳定性高的特点,以在有限的空间内装备更多的科学载荷仪器。国内外多数研究机构都在研发高集成度、低成本、小体积的航天器电源,推动气象遥感卫星、微小卫星和新一代深空探测等任务不断进步。

2) 高能量密度

能量密度是衡量蓄电池组性能的重要指标,也是实现小体积电源系统的有效解决手段。近十年来航天器电源技术

具有多项突破性进展,如上海空间电源研究所突破了全密封锂离子蓄电池组的瓶颈,将质量能量密度提升超 40%^[29]。NASA 成功研发了硫磺纯固态电池,电解质材料利用廉价并易于获得的硫,电池能量密度达 500 Wh/kg^[30]。

3) 大功率长寿命

空间站、大容量通信卫星等大型航天器具备大型化、大功率、长寿命的特点,以满足其长期在轨、多载荷协同工作的大功率需求。一些新技术的应用,将有效提升航天器电源系统的功率输出能力和使用寿命,有效推动航天器电源技术的发展。

2 航天器电源建模与仿真技术体系

从航天器健康管理和智能运维的视角,电源系统的建模仿真技术体系由基础层至顶层可分为 4 层,依次为对象层、模型层、仿真层、应用层。航天器电源建模仿真技术体系如图 2 所示。

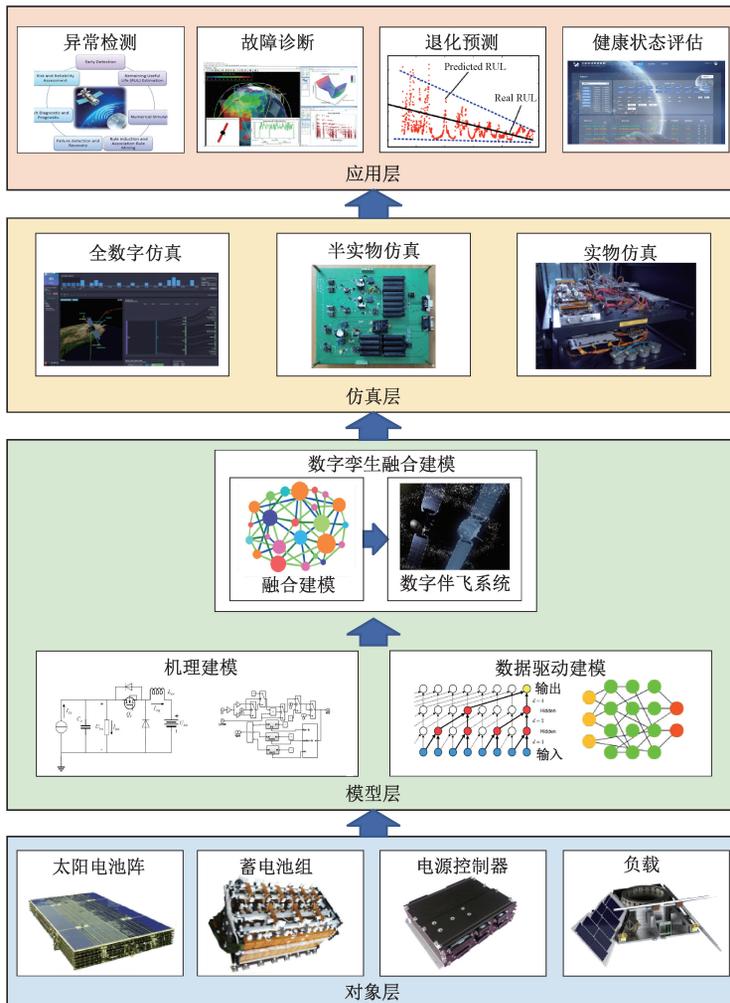


图 2 航天器电源建模仿真技术体系

Fig. 2 The framework of modeling and simulation technology for spacecraft power supply

2.1 技术体系概述

对象层是整个电源系统建模仿真技术体系的基础,对太阳能电池阵-蓄电池组电源的建模仿真研究通常针对太阳能电池阵子系统、蓄电池组子系统、电源控制子系统及负载等展开。子系统自身呈现“多输入-多输出”的响应模式,子系统间相互级联、紧密耦合,使航天器电源系统整体呈现复杂的组成结构和连接关系。

模型层根据各子系统的工作原理、工作状态及大量遥测数据、测试数据进行多尺度多领域建模,使所建立的模型尽可能与物理实体的运行状态保持一致,高保真是建模最重要的目标之一。常用的建模方法包括机理建模、数据驱动建模及数字孪生融合建模。机理建模以专业知识为基础,通过分析系统变量间的关系,计算系统的数学解析模型。但面临复杂条件与工况时,通常需要进行假设与简化。相比于机理建模方法,数据驱动建模可以直接利用监测数据挖掘运行状态内部的函数关系,不依赖于内部机理。而数字孪生融合建模是近几年新兴的建模方法,融合了机理建模与数据驱动建模方法,使模型更接近于系统的实际运行状态,并构建系统的数字孪生体。数字孪生思想为航天器电源系统的建模与仿真提供了新的解决思路,可使很多具有挑战的研究问题得到充分关注和突破,同时也可对数字伴飞系统提供良好的研究基础。

仿真层基于建立好的模型并借助计算机软件 and 硬件实现功能和性能仿真。主流的仿真方法包括实物仿真、全数字仿真和半实物仿真等。实物仿真主要应用于计算机软件应用不完善的时期^[31],全数字仿真则完全依赖于计算机开展,半实物仿真使用实物替代全数字仿真的部分结构,可有效提高仿真结果的准确率。

应用层是整个电源系统建模仿真技术体系的最顶层,是电源系统建模与仿真在健康管理和智能运维领域的实际应用。电源系统的建模与仿真,对航天器电源的异常检测、故障诊断、退化预测和健康状态评估研究具有重要意义。应用层直接面向使用者,良好的交互性和稳定性是重要的评价指标。

2.2 机理建模

针对航天器电源系统机理建模,需要通过分析电源系统的组成和工作原理,建立电源系统的数字化模型。常用方法是使用等效电路法^[32]、电学定律法^[33]或数学等效模型法^[34]建立输入与输出间的关系,表征电源系统的运行状态。

航天器电源的机理建模主要依赖于以下几方面的技术支撑:数学建模、电路等效、控制逻辑等效等,实现对航天器电源系统运行机理的精确描述。航天器电源的高保真机理建模是实现航天器数字伴飞的重要保证。以下针对航天器电源典型部件的机理建模方法进行总结。

太阳能电池阵的机理建模通常使用等效电路模型、解析模型等。太阳能电池阵等效电路模型一般以开路电压、短路电流、直流内阻等基本参量表征系统的工作原理与动态特性,并基于等效原理构建电路模型。三结砷化镓是目前航天器中最常用的太阳能电池阵材料。三结砷化镓太阳能电池由 GaInP₂/InGaAs/Ge 叠层光伏电池构成,可等效为 3 个单结电池片串联而成,自上向下为顶层、中间层和底层,其等效电路模型的基本结构由恒流源、二极管、并联电阻、串联电阻组成^[35],三结砷化镓太阳能电池阵的等效电路模型如图 3 所示。文献[32]使用等效电路法基于半导体理论建立了理想条件下太阳能电池片的机理模型,描述了电池片的 $I-V$ 特性曲线,并根据此电路实现简单、快速的太阳能电池阵机理建模。解析模型使用数学方程表示模型的运行机理,但通常需经过复杂的推导才可以获得准确的解析模型。文献[36]通过建立太阳能电池片及方阵的解析模型,验证了模型特性,并实现了仿真。另外,解析模型还可用于不同条件下系统相关参数的辨识^[37]。

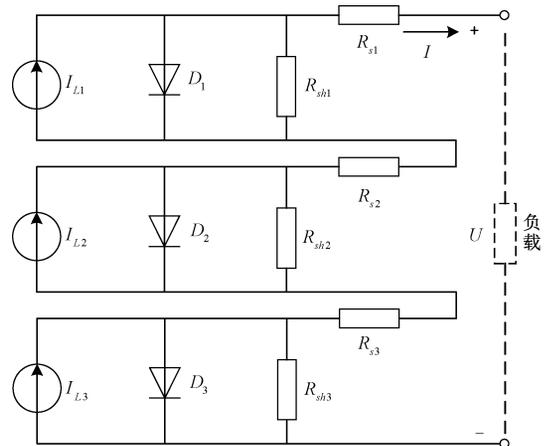


图3 三结砷化镓太阳能电池阵等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of triple-junction GaAs solar cell array

蓄电池组的常用模型主要包括电化学模型、等效电路模型等。电化学模型描述了电池内部的能量传递、电荷转移、化学反应等过程,结合电极电势理论及荷电状态 (state of charge, SOC) 进行表达,对于研究微观变化反应具有重要作用,但建模需要较多的电池参数^[38]。锂离子电池是航天器最常用的蓄电池之一,放电时,负极材料的锂离子失去电子,从负极材料中脱嵌,在浓度差的影响下经过电解质和隔膜后嵌入正极材料中,充电过程则与之相反^[21]。通过锂离子在正、负极间的往复运动,锂离子电池实现电能的存储和释放,锂离子电池放电时的电化学模型如图 4 所示。等效电路模型是蓄电池组建模研究较为成熟的方向之一,常见的等效电路模型包括 RC

(resistance-capacitance) 模型、Rint 模型、Thevenin 模型、PNGV (partnership for a new generation of vehicles) 模型等^[39]。通常,按照蓄电池运行原理建立初始机理模型后,还需按系统实际工作特性对初始机理模型进行不断优化,进一步提高其保真度。如工程应用较多的 Thevenin 模型,虽然能模拟充放电条件下电池的暂态反应,但对于极化效应的模拟不够充分。经过优化的二阶 Thevenin 模型则可全面的模拟蓄电池的电化学极化和浓差极化效应。文献[40]使用电学定律法建立了卫星锂离子蓄电池充放电机理模型,并探究了太阳入射角、星体遮挡等不同输入条件对太阳电池阵输出功率和蓄电池组充放电的影响。

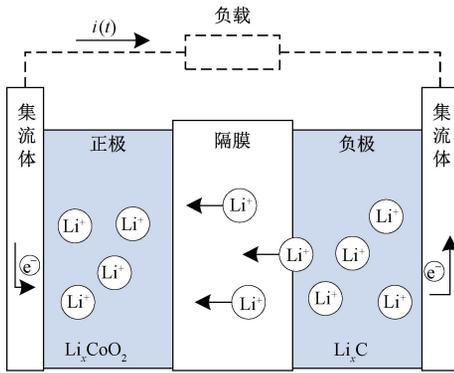


图4 锂离子电池放电电化学模型

Fig. 4 The electrochemical model of lithium-ion battery discharge

电源控制器负责对电源系统的能量进行分配和调节,其具有多个控制单元和复杂的控制逻辑,故对电源控制器的机理建模多采用等效电路模型、控制模型等。文献[41]使用 Simulink 软件对微纳卫星电源系统的充放电控制器、功率控制分配单元和负载建立等效电路模型,用于太阳同步轨道卫星不同工况下电源系统的仿真。文献[42]通过 Saber 软件搭建并优化了卫星电源控制器的等效电路模型,通过模型验证了电路设计的可靠性并辨识相关参数。控制模型依据控制理论,使用传递函数、时频变换等方式简化复杂的控制逻辑,建立闭环的线性系统,能清晰地表征电路的控制逻辑。如文献[43]建立了基于 S^3R 拓扑的航天器电源控制器的控制模型,通过计算电压控制滞回电路的线性方程及系统的开环传递函数,构建母线输出的闭环线性系统。

综上所述,针对不同的航天器电源部件或子系统,可根据需要选取不同的机理建模方法。同时,为了保证模型的准确性,还需要考虑航天器电源空间环境、光照变化等因素,如太阳电池片在轨工作的太阳光入射角、光照强度、太阳电池阵表面温度等参数,根据实际在轨环境参数对模型进行优化和修正^[44],以建立高保真的电源模型,这方面研究有待进一步深入。

除了正常状态下的建模,电源系统故障建模对于故障预警、优化故障处理方案具有重要的意义。航天器电源系统一旦发生严重故障,将会直接导致整个飞行任务的失败,造成巨大的经济损失。电源系统的故障种类繁多,主要包括各类突变故障、间歇故障和渐变故障。突变故障对航天器的影响较大,突然发生的严重故障可能使航天器的供电系统瞬间失效,如航天器电源系统的母线电压、母线电流突变,会造成负载工作异常^[45];间歇故障常伴随伪周期出现;渐变故障最难以察觉,常由于长期退化导致,如太阳电池阵转换效率下降、蓄电池组内阻增大、可用容量下降^[46]等。

国内外针对太阳光伏电源机理建模已开展了较多研究,建立了较为完整的基础性机理模型。但现有的机理模型偏于理想化,存在较大失真,且大多不能动态适应在轨复杂工况,需要进一步开展研究。

2.3 数据驱动建模

基于数据驱动的模式构建方法采用统计、机器学习以及人工智能等理论对数据进行“黑盒”的刻画,通过挖掘数据中的内在信息建立数学模型并表达系统运行状态,以表征输入参量与输出参量间复杂的拟合关系^[47]。

相比于一般系统建模,航天器电源的数据驱动建模更侧重于数据集的平衡性和模型的动态适应性。根据方法类别的不同,数据驱动建模可分为机器学习方法和统计建模方法^[48]。以下针对航天器电源典型部件的数据驱动建模方法进行总结。

太阳电池阵的数据驱动建模适合使用机器学习的方法实现,其中应用较为广泛的是人工神经网络^[49]、模糊神经网络^[50]等。人工神经网络通过训练数据获得模型输入与输出间的关系,将太阳电池阵的温度、光照强度、光电转换效率、太阳入射角及电池阵的基本参数作为模型输入,将太阳电池阵的电压、电流作为输出,经过不断反馈计算,迭代出网络的连接权值和误差。人工神经网络被证明是非线性动态系统的通用估计器,针对不同系统的数据驱动建模具有良好的适应性^[51]。应用于太阳电池阵建模的人工神经网络主要包括反向传播 (back-propagation, BP) 神经网络、径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络等。文献[52]使用 RBF 神经网络建立太阳电池阵的模型,并进行了 $I-V$ 、 $P-V$ 的特性预测,模型相对于传统神经网络具有更好的性能。模糊神经网络是将模糊理论与人工神经网络结合的模型,模糊神经网络结构分为 5 层,为输入层、模糊化层、模糊推理层、反模糊化层、输出层,每层间由模糊函数相连接。将太阳电池阵的环境参数、温度、光照强度作为模型的输入,使用输出误差更新网络参数,降低对气候等因素的敏感程度,获得输出电流^[50]。在太阳电池阵建模中,自适应模糊推理系统 (adaptive neuro-fuzzy inference system,

ANFIS)是最常用的模糊神经网络。文献[53]结合先验知识,为太阳能电池阵建立 ANFIS 模型,模型对于数据量需求大幅降低,且相比神经网络具有更小的误差。文献[54]建立了太阳能电池阵最大功率点跟踪的 ANFIS 模型,有效提高了模型在变化环境中的精度。

蓄电池组的数据驱动建模是目前研究较多的方向之一,常使用机器学习的方法实现,主要包括深度学习(深度置信网络)、时间序列模型(循环神经网络、长短期记忆网络)等。为了对更加复杂的系统结构建立准确的模型,深度学习成为了机器学习的新方向^[55]。深度学习通常是具有多层神经元的自编码神经网络,通过多层处理与迭代,将低层特征转化为高层特征,实现复杂系统的建模、分类等任务^[56]。蓄电池组内部电化学反应复杂,对数据样本的要求较高,传统人工神经网络建模难以充分利用先验知识,建模精度受限,深度置信网络(deep belief networks, DBN)等深度学习方法逐步应用于航天器蓄电池组建模。DBN 将蓄电池组的充、放电电流、SOC, 电池额定容量等参数作为模型的输入,将蓄电池组的电压作为模型的输出,通过对受限波尔兹曼机(restricted Boltzmann machines, RBM)的训练、特征逐层变换、反向调优,建立起输入到输出的函数关系,保留原始特征并降低维度。DBN 在提高建模精度的同时,支持非监督学习,有效解决了蓄电池组数据无标签的问题,同时可结合卡尔曼滤波器消除噪声影响^[57]。文献[58]提出了一种优化的卫星蓄电池组 DBN 模型,使用贝叶斯算法获得 DBN 模型的最优超参数并初始化模型,通过增量更新实现了输出参量的快速预测。蓄电池组的遥测数据可等效为一组时间序列,故可为蓄电池组建立时间序列模型。循环神经网络(recurrent neural network, RNN)因其网络结构的特性具有短期记忆能力,可用于建立时间序列模型。而长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)在一定程度上解决了梯度弥散和梯度爆炸问题,使其可处理长期的时间序列数据^[59]。为蓄电池组建立时间序列模型对具有时间特征的监测数据进行训练,获取蓄电池系统的工作状态。由于能在较长的时间内存储有效信息,时间序列模型对于准确描述蓄电池组的退化情况具有重要的意义。文献[60]为 LEO 卫星电源建立双向 LSTM 模型,预测蓄电池的电流和电压,通过无迹卡尔曼滤波器估计蓄电池 SOC。文献[61]提出了一种 RNN 与状态空间估计相结合的锂离子电池建模方法,有效降低模型复杂度并减少参数,并实现电池剩余寿命的预测。

航天器电源的负载功率与航天器的任务及轨道相关,任务的多元化致使负载一般难以建立机理模型。对负载的分析,通常使用统计建模的方法实现,典型应用是建立时间序列的差分整合移动平均自回归(autoregressive

integrated moving average, ARIMA)模型对已有遥测数据进行学习,并对预期负载功率进行预测。ARIMA 模型由自回归(autoregressive, AR)模型和移动平均(moving average, MA)模型组合而成,通过调整自回归项数、差分项数和移动平均项数得到不同的 ARIMA 模型,对时间序列进行数据驱动建模^[62]。如文献[63]结合了 BP 神经网络和 ARIMA 用于建立深空探测器的负载数据驱动模型,可准确预测其在轨工作的负载功率。

电源控制器的工作机制由多路控制逻辑实现,较少依赖于遥测数据,故对航天器电源控制器建立数据驱动模型的研究较少。但随着模糊理论研究的深入,部分学者将模糊理论融入充放电控制逻辑中。文献[64]设计了基于模糊的锂离子蓄电池充放电控制模型,有效降低了控制的复杂性,提高了控制效率并节省了大量的传感器元件。文献[65]提出了具有模糊神经网络的最大功率点跟踪控制器,可调整学习参数和神经网络中的连接权重,实现高效快速地跟踪太阳能电池阵输出的最大功率点。

大量数据样本是数据驱动建模的基础,航天器电源系统的数据样本大多来自于在轨航天器的遥测数据和测试数据。遥测数据通过测控链路持续传输,其数据量巨大^[66],但航天器电源领域正常数据样本多、故障数据样本少。而通过对航天器真实电源进行故障注入以生成故障样本的风险和代价较大,使用数字建模仿真或半实物仿真系统模拟生成的故障样本与实际故障样本会有一定的差异。上述数据集类不平衡问题给数据驱动建模带来了较大挑战^[67],成为了困扰健康管理和运行维护实用化的基础性瓶颈问题之一。近年来,国内外学者针对故障样本少、类不平衡的问题提出了相关改进方法,如虚拟样本增广法^[68]、代价敏感法^[69]、重采样法^[70]、特征选择方法^[71]等。

此外,由于在轨航天器运行环境动态变化,在轨工况复杂多变,对模型的动态适应性提出了较高的要求。文献[72]采用马尔可夫链和二元决策图相结合的动态故障树分析方法对卫星电源系统进行了动态建模研究,有效解决了传统故障树无法表征动态特性的问题。

综上,在航天器电源健康管理及智能运行维护领域,平衡化的电源数据样本构建、在轨动态工况辨识等都是数据驱动建模的重要研究方向,有待进一步深入研究。

2.4 数字孪生融合建模

航天器电源系统作为典型的 CPS,对其建立高保真动态模型受到了学者的广泛关注。鉴于在轨航天器电源工况的复杂性和时变性,单纯依赖机理模型,虽可从电源的结构、电路的等效及控制关系方面直接建立等效模型,但无法实现对在轨工况的动态适应;单纯依赖数据驱动

模型,虽能通过机器学习方法动态识别工况并进行趋势预测,但模型缺乏工作机理和本质的表达。数字孪生融合建模将“机理”和“数据”有机的融合,通过机理分析确定模型结构,使用实时遥测数据确定模型参数,可有效消除建模过程中原理与数据特征分离的情况。

航天器电源的数字孪生融合建模主要依赖于以下几方面的技术支撑:数字仿真、数据分析、虚拟现实、参数辨识、模式识别、VR可视化等。数字孪生建模的最终目的是实现航天器关键系统的数字伴飞,开展对象系统的健康状态分析、故障诊断或预测,优化物理对象的控制逻辑并进行决策^[73]。

通过机理模型和数据模型的融合和校正,使地面数字模型与在轨航天器电源的精准映射和同步,是实现在轨航天器电源健康状态高精度感知的科学基础。目前数据模型与机理模型相融合的方法主要有两种思路。1)以机理模型为主,利用数据驱动的方法对机理模型的参数进行修正。这种方案可保留机理模型的物理输出特性,利用数据驱动模型动态学习能力弥补机理模型泛化能力差的不足^[74];2)将两种模型进行集成,依据两者输出的置信度进行加权,得到最后的融合结果^[75]。文献[20]基于思路1),利用 Simulink 构建航天器电源系统的基础模型,并将实体运行环境数据作为模型输入,迭代并优化模型,产生的虚拟遥测数据可反映航天器电源系统的运行状态。文献[76]基于思路2),结合物理层机器学习的思想,将机理模型与数据驱动模型集成,以提高预测性能并降低模型训练成本。文献[77]首次构建了基于低成本模块和软件开发的数字孪生平台,用于评估卫星锂离子电池组的退化情况,可为锂离子电池的健康管理和状态监测提供新的思路和解决方案。

建立准确度高、同步性好的数字孪生模型,需要精确的机理模型、高精度的传感系统、完备的数据分析、状态估计技术及智能决策等技术。数字孪生融合建模尚处于研究的起步阶段,对航天器电源典型部件建立数字孪生融合模型的研究还较少。上海空间电源研究所研究了航天器电源蓄电池组的数字孪生融合模型,通过模型对在轨卫星电源的实时模拟,可实现蓄电池组 SOC、健康状态的精确诊断和预测^[17]。航天器电源数字孪生融合建模的难点在于机理和数据层面的融合与互补。如何将高精度的传感数据特性与系统的机理模型合理有效的结合起来,获得更好的状态评估与监测效果,值得进一步研究和关注。

2.5 建模方法小结

通过对航天器电源典型部件的机理建模、数据驱动建模、数字孪生融合建模的分析,对典型航天器电源系统适合使用的建模方法进行总结,为航天器电源建模的工

程应用提供参考。太阳能电池阵适合使用机理建模方法,以等效电路模型为主,目前使用等效电路建立太阳能电池阵模型的研究成果较多;蓄电池组的建模研究最为广泛,代表性模型为等效电路模型和深度学习模型;电源控制器适合使用机理建模方法,代表性模型为等效电路模型和控制模型,可以清晰地描述系统的控制逻辑;负载适合使用数据驱动建模方法,以时间序列 ARIMA 模型为主,用于提取遥测数据与负载状态间的特征关系。

综上所述,在机理建模中,等效电路模型具有较好的通用性,适合应用于大多数航天器电源的典型部件建模,模型可解释性好,是最适合工程应用的建模方法。在典型部件数据驱动建模中,人工神经网络及深度学习是最常用的建模方法。随着卫星电源结构日益复杂化,以机理模型为核心,利用数据驱动模型对机理模型的参数进行修正和补充,实现模型的融合,以建立高保真、动态化模型是航天器电源建模的重要发展趋势。

2.6 航天器电源的仿真技术

1) 航天器电源仿真技术分类

航天器电源仿真技术主要可分为3类:全数字仿真、半实物仿真和实物仿真。

(1) 全数字仿真

全数字仿真通过构建系统或分系统的数学模型,利用计算机完成数学模型迭代计算,以模拟系统的实际运行情况。航天器电源的全数字仿真通过计算机软件,设置多种灵活的仿真条件,可实现航天器电源在多种复杂条件下的模拟。NASA Ames 研究中心基于全数字仿真技术开发了全数字 ADAPT 系统,该系统具有完善的模型资源库,包括蓄电池组、太阳能电池阵、配电模块等,可高效仿真航天器电源系统的工作状态,验证系统结构,对航天器电源的仿真具有良好的通用性和可重复性。全数字 ADAPT 系统可实现电源系统的仿真建模、静态分析、动态测试,通过建立部件间电学连接并计算模型仿真输出,为典型部件及控制逻辑的开发、测试和验证提供虚拟运行环境,为健康管理算法提供量化评价的依据。同时,全数字 ADAPT 系统中包含数百个故障模拟源,通过基于角色对抗的故障注入,可实现快速的故障预测与评估诊断^[78-79]。文献[80]通过 Saber 和 Simulink 软件联合开展卫星电源控制器的全数字仿真,验证了电源控制器设计的有效性。文献[81]对 GEO 卫星电源的分系统建立模型后,重点应用 Simulink 软件进行了典型故障模式的全数字仿真,通过数字手段进行故障注入,实现了典型特征的故障诊断。文献[82]通过 MATLAB 软件进行建模仿真验证了 SAR 卫星电源系统设计的合理性。随着仿真技术的快速发展,航天器电源的全数字仿真呈现智能化、通用化、普适化的发展趋势^[83],并涌现出多种可供航天器电源使用的仿真软件。

(2) 半实物仿真

半实物仿真将全数字仿真中的部分模型以实物的形式替代,而难以使用实物的部分则以数学模型表示,结合计算机软件与实物模型共同开展仿真研究^[84]。半实物仿真技术的优点是通过使用部分实物代替数学模型,使模拟仿真的效果更加接近实际系统的工作状态。

在航天器电源系统的半实物仿真中,通常蓄电池组、电源控制器和负载分系统以实物模型表示,电源控制器分别建立充电调节器、放电调节器及分流调节器模型。太阳能电池阵的实物模型保真度有限,多以数字化模型表示^[84]。哈尔滨工业大学在航天器电源半实物仿真领域具有持续性的研究,先后研发了卫星电源分系统模拟平台与状态监测平台^[85],基于峰值功率点跟踪的卫星电源半实物仿真系统^[86]等,并使用所建立的半实物仿真平台实现航天器电源分系统的故障注入和故障模拟。航天器电源半实物仿真的重要应用之一即为典型故障模式的仿真,如文献[87]通过半实物仿真平台,建立了任意损伤条件下太阳能电池阵的输出模型,研究损伤对卫星电源剩余寿命的影响。

(3) 实物仿真

实物仿真也称为物理仿真,使用具有相似物理性质或缩小比例的实物替代大型装备进行仿真模拟。实物仿真更加形象,与真实系统的区别往往最小,但其成本高、容错性差,主要应用于早期计算机仿真技术不成熟的年代^[88]。随着全数字仿真和半实物仿真的发展,其仿真代价明显小于实物仿真,故航天器电源等复杂系统的实物仿真在近十年的研究中已较为少见。

2) 航天器电源仿真软件

目前应用于航天器电源仿真领域的软件主要分为两类,即通用建模和仿真软件、专用的航天器电源系统仿真软件。

(1) 通用仿真软件

通用电路仿真软件主要包括 PSPICE^[89]、Saber^[80]、Matlab/Simulink^[41]等。PSPICE 是由美国 Microsim 公司在 SPICE 软件基础上升级而来的,具有对模拟电路、数字电路、数/模混合电路仿真的能力。Saber 是美国 Analog 公司研发的系统仿真软件,其应用领域广泛,通过硬件描述语言、数学公式、控制关系表达式等直接进行系统级仿真。Simulink 包含丰富的电源模块、电力电子等模块,通过图形连接的方式可实现方便快捷的仿真模型构建,实现系统的准确仿真。

(2) 航天器电源专用仿真软件

航天器电源专用仿真软件通常会包含空间环境、辐射等因素对电源系统的影响,并具备较为完善的数据库资源,专用仿真软件主要包括 VTB^[90]、PTS^[91-92]、SPECTTRA 分析平台^[93]等。VTB 是美国南卡罗来大学设计的电源系统仿真软件,其能与 MATLAB/Simulink、

LabVIEW 等软件联合仿真,为多领域建模提供仿真平台。南卡罗来大学的 Jiang 等^[90]使用 VTB 通过数学描述对蓄电池组进行了全面仿真,比较了锂离子蓄电池和镍氢蓄电池的性能。PTS 由洛克希德·马丁公司研发,包含多个型号的太阳能电池阵、蓄电池组等模型库,能够对航天器电源系统进行瞬态分析,开展非线性仿真、功率计算等工作。美国航空航天学会基于 Simulink 内核开发了 SPECTTRA 航天器电源分析平台,主要在航天器电源的早期设计中用于验证已有设计和系统架构分析。

3 航天器电源建模与仿真的典型应用

航天器电源系统建模与仿实在航天器电源的设计、研制、运行维护各阶段均具有重要的作用。在设计阶段,利用电源建模仿真技术对设计方案进行仿真验证和分析,支撑设计方案优化;在研制阶段,可利用建模仿真技术加速研制进程,并对研制中出现的软硬件问题进行复现和模拟;在运维阶段,开展电源的健康管理,利用建模仿真技术制定故障的快速解决方案。本文重点面向航天器电源的智能运维和健康管理领域,总结建模仿真技术在该领域的典型应用。

3.1 在轨智能运维与故障模拟

航天器电源在轨工作环境多变,易受到空间辐射、温度变化、太空碎片碰撞等影响,诸多不可预见性因素可能加快航天器的性能退化或导致系统故障^[94]。建模与仿真方法可模拟航天器电源的在轨运行状态,以对在轨复杂环境的影响进行预测,开展智能运行维护研究,为故障的有效维修和快速处理提供理论支撑。文献[95]提出了一种具有迭代更新策略的混合模型,支持小数据样本的航天器锂离子电池长期在轨剩余寿命预测,指导航天器电源的运行与维护。

另外,航天器电源系统遥测数据的正常样本多,异常样本少,数据类不平衡问题突出。同时,航天器电源造价高昂,对其进行故障注入往往属于破坏性实验,受系统的响应速率及链路传输的影响,实验效率较低^[96]。通过建模与仿真进行电源故障的模拟生成,具有可重复性、经济性、快速性,易于对故障注入程度进行量化等优点。同时,在仿真系统上进行故障模拟注入,可对系统的鲁棒性和健壮性进行有效评估。文献[97]设计了航天器供配电数字伴飞系统,用于故障状态模拟与故障预案快速推演。通过修改运行参数,伴飞系统可按照故障预案进行故障模拟和验证。

3.2 航天器电源的健康管理

各类航天器为国家带来巨大经济效益的同时,其安全性和可靠性逐渐成为航天领域的重中之重。建模与仿

真是实现航天器电源系统健康管理的重要基础,主要用于为电源系统的异常检测^[98]、故障诊断^[99]、退化预测^[100]及健康状态评估^[101]提供模型和数据等基础性支撑。

1) 异常检测

异常是故障的早期表现,及时发现异常并采取措施是防止故障发生的有效手段。异常检测可以有效监测航天器电源的运行状态,已成为增强航天器在轨可靠性和安全可靠运行的重要手段^[102]。常用的异常检测方法主要包括阈值自动判读^[103]、专家经验数据判读^[104]及基于模型的异常预测^[105]。前两种方法原理简单且容易实施,以 NASA 为代表的研究机构开展了大量研究并持续对航天器的锂离子电池组开展异常检测^[106]。随着大数据和云计算技术的快速发展,基于模型的异常预测方法已受到国内外学者的广泛关注。如文献[107]建立了基于最小二乘向量机的航天器太阳电池阵模型,提出了太阳能电池阵的异常检测方法,使用遥测数据形成训练集,实现了太阳电池阵无监督健康状态监测。文献[104]融合了无监督学习与专家经验方法,建立数据驱动模型,对遥测数据进行特征提取和异常识别,实现卫星主要分系统的异常检测。

及时有效地发现航天器电源遥测数据中存在的异常模式,并对在轨电源进行远程指令修复、软件故障排除、故障预案制定或维护服务优化等操作,对于提升航天器电源安全性及可靠性具有显著的现实意义。

2) 故障诊断

故障诊断是在航天器电源异常状态的基础上,进行电源系统的故障定位,并对故障类型进行识别。广义上来说,故障诊断共包含3个具体过程,依次为故障检测、故障隔离和故障识别。先进的故障诊断技术能够预警故障,降低故障发生概率,或在航天器电源系统故障发生的第一时间进行故障检测和识别,降低故障的危害性^[108]。以 NASA 为代表的研究机构已建立起完善的航天器电源故障诊断平台 ADAPT,融合多种模型并建立故障检测框架,实现航天器电源的故障诊断^[78]。随着数据处理能力的大幅提升,基于数据驱动建模的航天器电源系统故障诊断^[109-110]已成为领域重要的研究方法,且针对复杂的时变工况实现了动态故障的诊断^[111]。随着数字孪生建模思想的不断探索与研究,航天器电源系统将实现数字伴飞,利用虚拟空间中的孪生体开展决策迭代与优化,为航天器电源的故障诊断提供新的解决方案。

3) 退化预测

航天器长期在复杂而恶劣的太空环境中运行,航天器电源系统及典型部件会发生性能退化,导致电源系统异常或失效。对航天器电源进行退化状态评估和剩余寿

命预测是掌握电源性能衰退程度的重要手段。国外研究机构中,NASA、加州理工大学、滑铁卢大学等对航天器蓄电池的退化研究较为深入,在各种温度、放电深度下开展了完备的性能寿命测试,并模拟多种轨道航天器电源,建立并迭代退化模型,预测其退化状态^[112-113]。国内研究机构中,上海空间电源研究所与哈尔滨工业大学针对我国货运飞船的锂离子电池的状态监测需求建立模型,开展性能退化评估与预测^[114]。

针对航天器电源系统的退化预测,目前多采用建立退化模型并提取和预测健康因子(health indicator, HI)的方法实现^[115]。结合航天器电源的工作特点,退化一般发生在太阳电池阵和蓄电池组分系统中,主要体现为输出电流减小、光电转换效率下降、内阻增大等。如文献[116]通过对太阳电池阵电压、电流、太阳入射角及温度的采集和建模,模拟航天器电源在轨的工作环境,实现退化状态的预测。文献[117]建立三结砷化镓太阳电池阵模型,选取输出电流的变化进行寿命预测,获得了较高的精度。文献[118]提出了一种融合退化数据与寿命数据的贝叶斯模型,通过两个与退化相关的现象数据共同建立卫星蓄电池组的二元退化模型,有效提高蓄电池剩余寿命的预测精度。文献[119]提出了一种新的锂离子电池 HI 的计算与优化方法,通过建立蓄电池组模型采集充放电参数,使用相关向量机自动提取锂离子电池的 HI,并准确估计蓄电池的剩余寿命。

4) 健康状态评估

航天器电源的健康状态评估建立在异常检测、故障诊断、退化预测基础上,由 PHM 技术发展演变而来。健康状态评估核心功能包括状态监测、故障预测、剩余寿命预测及基于数据的健康评估等^[120-121]。随着全球在轨航天器正以极快的速率增长,航天器电源的健康状态评估的发展逐渐趋于智能化、综合化、通用化、实时化。依赖建模与仿真技术,NASA、ESA、新加坡国立大学等机构实现从最初的参数状态监视和基于简单知识的健康评价,到自主诊断和自适应评估管理,并在建模中融入了新方法,如滤波技术等,在航天器电源健康状态评估方面取得了良好的效果^[15,101]。相比国外先进技术,国内研究机构虽缺乏成熟的实验平台,但也开展了相关健康管理算法研究,为航天器电源的健康状态评估提供参考。文献[122]构建航天器电源的健康状态评估体系指标,使用模糊聚类的评价方法实现电源健康状态的等级评估,并建立神经网络模型预测电源系统剩余寿命。文献[123]建立卫星蓄电池组的人工神经网络模型,进行了蓄电池组的部件级、系统级、平台级健康状态评估,实现了评价指标与指标权重的自动学习优化及健康等级与异常趋势的分析。

4 研究挑战与发展展望

4.1 研究挑战

随着航天器在轨数量的快速增长和航天器电源日益复杂化,航天器电源系统建模仿真仍存在模型失真、模型失配、模型动态适应性差等现实瓶颈问题。航天器电源建模与仿真的技术挑战可总结为4个方面。

1) 在轨航天器电源的高保真动态建模挑战。目前的电源建模多为静态建模,且研究多集中于空间锂电池的退化建模,已建立的太阳电池阵、电源控制器等机理模型偏理想化,存在较大失真,模型的输入输出大多为预设的固定参数,不能动态适应在轨复杂工况。

2) 多工况下的电源数据建模挑战。由于航天器电源内部传感器数量有限,遥测下传链路资源有限、仿真故障数据不够保真、各故障工况下的实际数据样本缺失等制约,导致目前对电源各种工况下的数据建模不够充分,数据样本分布极不平衡,限制了数据驱动模型和仿真系统的准确性和实用性。

3) “机理”与“数据驱动”融合建模挑战。目前航天器电源机理模型和数据模型的融合和校正研究较少,融合方法不成熟。由于两种模型属于不同的基础科学问题,两种模型的建模和仿真方法差异较大。对二者进行融合还处于探索与起步阶段,目前缺乏系统的融合理论和标准的模型融合方法,限制了数字伴飞在航天器电源健康管理中的应用。

4) 在轨验证挑战。现有建模仿真多基于仿真数据或公开数据集开展研究和验证,模型的在轨验证不够充分。尤其针对在轨航天器电源建立数字孪生模型,使用在轨航天器验证模型较为少见。这导致模型在轨实际验证不够充分,且模型的验证缺乏统一的评价指标,难以应用于实际在轨任务。故迫切需要建立航天器电源模型评价的指标体系和评价方法,创新模型在轨验证方式,推动模型在轨实际应用。

4.2 发展展望

面向航天器电源健康管理和智能运维需求,航天器电源建模与仿真技术的发展趋势如下:

1) 高保真多尺度建模

为准确模拟航天器电源系统的运行状态,高保真、多尺度建模仿真已成为必然趋势。可针对电源机理模型在动态输入输出、长期退化和随机噪声影响下的高保真建模和优化方法开展研究,实现从部件到电源系统的高保真、多尺度建模仿真。

2) 动态化建模

动态化建模体现在模型可与在轨电源实体相互映射,动态更新。由于在轨航天器的工作状态不断更新,故所建立的模型需具备动态更新能力,能与在轨模型动态映射,从遥测数据中获取模型动态输入输出参数,动态更新模型。动态化建模主要依靠数据驱动建模实现,数据模型可从实时遥测数据中动态提取关键参数信息,为模型的动态化更新提供输入输出信息。

3) 多模型融合

对于航天器电源这类复杂信息物理系统,多模型的融合通常具有单一模型无法达到的建模精度或仿真效果。通过机理模型和数据驱动模型的融合和闭环校正,可构建航天器电源系统的数字孪生模型,实现虚实空间精准映射和同步。

4) 数字孪生体与数字伴飞

数字孪生以集成高保真物理模型构建与仿真、先进传感技术、高精度状态评估与预测方法等技术为基础,实现了复杂装备全寿命周期的状态监测、评估与预测。数字伴飞系统以电源系统的数字孪生体为核心,准确实时模拟航天器电源系统在轨的运行状态,通过虚实交互技术实现航天器电源系统运行状态评估,辅助制定在轨运行策略、故障状态模拟及预案推演。

5 结 论

航天器电源是高度复杂的信息物理系统,涉及光、机、电、控、热诸多领域,为在轨航天器提供稳定的能量来源。由于在轨电源健康管理和智能运维的迫切需求,航天器电源系统的高保真、多尺度、动态化建模仿真已成为国内外学者广泛关注的基础科学问题之一。本文针对航天器电源健康管理和智能运维领域的建模仿真开展综述性研究,在总结航天器电源系统的种类、组成及拓扑结构的基础上,归纳了航天器电源建模与仿真的技术体系,综述了机理建模、数据驱动建模和数字孪生融合建模3种建模方法,分析了全数字仿真、半实物仿真、实物仿真3种电源仿真方法和常用仿真软件,总结了建模仿真技术在电源健康管理和智能运维领域的典型应用。最后,分析了航天器电源建模仿真技术的研究挑战,展望了未来的发展趋势。本文可以为航天器健康管理与智能运维、航天器电源建模与仿真、数字孪生等领域的研究人员提供一定的参考和借鉴。

参考文献

[1] 彭喜元, 庞景月, 彭宇, 等. 航天器遥测数据异常检测综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1929-1945.

PENG X Y, PANG J Y, PENG Y, et al. Review on

- anomaly detection of spacecraft telemetry data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 1929-1945.
- [2] 向刚, 韩峰, 周虎, 等. 数据驱动的航天器故障诊断研究现状及挑战[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 1-16.
XIANG G, HAN F, ZHOU H, et al. Data-driven method for spacecraft fault diagnosis: State of art and challenge[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2021, 35(2): 1-16.
- [3] 中国科学院空间领域战略研究组. 中国至 2050 年空间科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 11-25.
Space Strategy Research Group of Chinese Academy of Sciences. China's space science and technology development roadmap to 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2009: 11-25.
- [4] 穆肯德·R·帕特尔. 航天器电源系统[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 40-65.
PATEL M R. Spacecraft power systems [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2013: 40-65.
- [5] 谭春林, 胡太彬, 王大鹏, 等. 国外航天器在轨故障统计与分析[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 130-136.
TAN CH L, HU T B, WANG D P, et al. Analysis on foreign spacecraft in-orbit failures [J]. Spacecraft Engineering, 2011, 20(4): 130-136.
- [6] ZEIGLER B P, KIM T G, PRAEHOFER H. Theory of modeling and simulation [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2000: 3-23.
- [7] 李伯虎, 柴旭东, 朱文海, 等. 现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J]. 系统仿真学报, 2004(9): 1871-1878.
LI B H, CHAI X D, ZHU W H, et al. Some focusing points in development of modern modeling and simulation technology [J]. Journal of System Simulation, 2004(9): 1871-1878.
- [8] KHEIR N. Systems modeling and computer simulation[M]. London: Routledge, 2018: 3-24.
- [9] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.
ZHANG L, LU H. Discussing digital twin from of modeling and simulation [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.
- [10] 王行仁, 文传源, 李伯虎, 等. 我国系统建模与仿真技术的发展——为纪念中国系统仿真学会成立二十周年而作[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6683-6688.
WANG X R, WEN CH Y, LI B H, et al. Development of system modeling and simulation technology in China[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(21): 6683-6688.
- [11] DELLEUR A M, KERSLAKE T W. Electrical performance from bifacial illumination international space station photovoltaic array[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2005, 42(1): 171-176.
- [12] DELLEUR A M, KERSLAKE T W, LEVY R K. Managing space station solar-array electrical hazards for sequential shunt unit replacement [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(1): 16-23.
- [13] DAIGLE M J, ROYCHOUDHURY I, BISWAS G, et al. A comprehensive diagnosis methodology for complex hybrid systems: A case study on spacecraft power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2010, 40(5): 917-931.
- [14] POLL S, PATTERSON-HINE A, CAMISA J, et al. Advanced diagnostics and prognostics testbed [C]. Proceedings of the 18th International Workshop on Principles of Diagnosis (DX-07), 2007: 178-185.
- [15] BARD F, CARRÉ A, FERNANDEZ P, et al. In-orbit trend analysis of Galileo satellites for power sources degradation estimation [C]. E3S Web of Conferences: EDP Sciences, 2017: 13005.
- [16] 刘治钢, 杜青, 李海津. 航天器电源系统建模与仿真[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021: 6-34.
LIU ZH G, DU Q, LI H J. Modeling and simulation for spacecraft power system [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021: 6-34.
- [17] 朱凯, 陈健, 吕桃林, 等. 空间电源数字孪生系统[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 197-205.
ZHU K, CHEN J, LYU T L, et al. Digital twin system for space power-sources [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(3): 197-205.
- [18] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
LIU D T, GUO K, WANG B K, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1-10.
- [19] 陈琦, 刘治钢, 张晓峰, 等. 航天器电源技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 23-77.
CHEN Q, LIU ZH G, ZHANG X F, et al. Spacecraft power system technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018: 23-77.

- [20] 庞景月, 赵光权. 数字孪生驱动多算法自适应选择的空电源系统故障检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 91-99.
PANG J Y, ZHAO G Q. Digital twin-driven multi-algorithms adaptive selection for fault detection of space power system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 91-99.
- [21] 刘大同, 宋宇晨, 武巍, 等. 锂离子电池组健康状态估计综述[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 1-18.
LIU D T, SONG Y CH, WU W, et al. Review of state of health estimation for lithium-ion battery pack [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 1-18.
- [22] 王友仁, 梁嘉羿, 黄薛, 等. 航空蓄电池能量均衡技术研究[J]. 航空学报, 2017, 38(5): 211-220.
WANG Y R, LIANG J Y, HUANG X, et al. Research of energy equalization technology for aircraft battery [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(5): 211-220.
- [23] DRUMEA A, MARGHESCU C, PANTAZICA M. Modelling and simulation of datalogging embedded module with solar panel supply and NiMH battery energy storage [C]. Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X, 2020: 1-4.
- [24] SONG Y CH, PENG Y, LIU D T. Model-based health diagnosis for lithium-ion battery pack in space applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12375-12384.
- [25] GARRIGOS A, CARRASCO J A, BLANES J M, et al. Modeling the sequential switching shunt series regulator[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2005, 3(1): 7-13.
- [26] DAKORA J D Y, DAVIDSON I E, SHARMA G. Review of modern solar power satellite and space rectenna systems[C]. 2020 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD): IEEE, 2020: 1-5.
- [27] ZHANG X, KANG Q, YU W T, et al. Power assessment indices of solar arrays under mppt and det methods for spacecraft[C]. 2019 European Space Power Conference (ESPC): IEEE, 2019: 1-4.
- [28] 李朋, 周军, 于晓洲, 等. 翱翔之星电源系统的设计与在轨验证[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1002-1007.
LI P, ZHOU J, YU X ZH, et al. Design and on-orbit validation of electric power system for aoxiang-sat [J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2018, 39(4): 1002-1007.
- [29] 姜东升, 程丽丽. 空间航天器电源技术现状及未来发展趋势[J]. 电源技术, 2020, 44(5): 785-790.
JIANG D SH, CHENG L L. Summary of present and trend for electrical power system of spacecraft [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(5): 785-790.
- [30] VIGGIANO R, DORNBUSCH D, WU J, et al. Solid-state architecture batteries for enhanced rechargeability and safety (SABERS) for electric aircraft [J]. ECS Meeting Abstracts, 2020, 2: 1012.
- [31] 张锦江, 李季苏, 吴宏鑫. 用单框架控制力矩陀螺的大型航天器姿态控制系统实物仿真研究[J]. 宇航学报, 2004(4): 382-388.
ZHANG J J, LI J S, WU H X. Research on physics simulation of large spacecraft attitude control system using SGCMG [J]. Journal of Astronautics, 2004(4): 382-388.
- [32] VILLALVA M G, GAZOLI J R, FILHO E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [33] AUNG H, SOON J J, GOH S T, et al. Battery management system with state-of-charge and opportunistic state-of-health for a miniaturized satellite [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(4): 2978-2989.
- [34] GREY J P, MANN I R, FLEISCHAUER M D, et al. Analytic model for low earth orbit satellite solar power[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(5): 3349-3359.
- [35] 王子龙, 张华, 刘业风, 等. 三结砷化镓光伏电池电学特性的理论和实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 168-174.
WANG Z L, ZHANG H, LIU Y F, et al. Detailed analysis of electrical characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 168-174.
- [36] 许盛之, 赵庚申, 王庆章, 等. 太阳能电池及方阵的模型与仿真[J]. 太阳能学报, 2006, 27(10): 979-981.
XU SH ZH, ZHAO G SH, WANG Q ZH, et al. Model and simulation of solar cell and array[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2006, 27(10): 979-981.
- [37] VANKADARA S K, CHATTERJEE S, BALACHANDRAN P K. An accurate analytical modeling of solar photovoltaic system considering R_s and R_{sh} under partial shaded condition [J]. International Journal of System

- Assurance Engineering and Management, 2022, 13(5): 2472-2481.
- [38] DAIGLE M, KULKARNI C S. Electrochemistry-based battery modeling for prognostics[C]. Annual Conference of the PHM Society, 2013: 1-13.
- [39] 黑文洁. 基于等效电路模型的锂离子电池模型参数辨识算法对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2018: 8-41.
HE W J. Comparison of lithium ion battery model parameter identification algorithms based on equivalent circuit model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018: 8-41.
- [40] 张勇, 鄢婉娟, 苏蛟, 等. 太阳同步轨道卫星电源系统供电模型及任务规划方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(S1): 1-7.
ZHANG Y, YAN W J, SU J, et al. Mission planning method and power supply model of PSS for the satellite in sun synchronous orbit [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(S1): 1-7.
- [41] SHER A, BAIG M S. Design and simulation of small satellite power system in simulink/matlab for preliminary performance estimation [C]. Proceedings of 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), 2019: 359-365.
- [42] 王伟. 基于 Saber 仿真的卫星电源电路分析与优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 9-51.
WANG W. The circuit analyses and optimal research study of satellite power based on saber simulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 9-51.
- [43] 马文伟, 鄢婉娟, 刘元默, 等. 基于 S3R 拓扑的电源控制器建模及稳定性分析[J]. 电源技术, 2019, 43(12): 2014-2016.
MA W W, YAN W J, LIU Y M, et al. Dynamical modeling and characterization of PCU based on S3R[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(12): 2014-2016.
- [44] 李涛, 李伟, 杨雷. 一种航天器太阳电池阵供电能力计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(7): 1355-1363.
LI T, LI W, YANG L. A calculation method for power supply capability of spacecraft solar array[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(7): 1355-1363.
- [45] 章玄, 邢杰, 余文涛, 等. 卫星电源系统短路暂态特性分析及对策[J]. 宇航学报, 2020, 41(9): 1212-1220.
ZHANG X, XING J, YU W T, et al. Analysis and countermeasures of short circuit transient characteristics for satellite power system [J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(9): 1212-1220.
- [46] HU Y, BARALDI P, DI MAIO F, et al. A particle filtering and kernel smoothing-based approach for new design component prognostics [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 134: 19-31.
- [47] HASSANIEN A E, DARWISH A, ABDELGHAFAR S. Machine learning in telemetry data mining of space mission: Basics, challenging and future directions [J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(5): 3201-3230.
- [48] 张玉杰, 彭宇, 刘大同. 飞机机电系统部件数据驱动健康状态在线估计方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 118-130.
ZHANG Y J, PENG Y, LIU D T. Review on data-driven health state on-line estimation methods for aircraft electromechanical system components [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 118-130.
- [49] GARUD K S, JAYARAJ S, LEE M Y. A review on modeling of solar photovoltaic systems using artificial neural networks, fuzzy logic, genetic algorithm and hybrid models [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(1): 6-35.
- [50] CHIKH A, CHANDRA A. Adaptive neuro-fuzzy based solar cell model [J]. IET Renewable Power Generation, 2014, 8(6): 679-686.
- [51] RAMAPRABHA R, MATHUR B L, SHARANYA M. Solar array modeling and simulation of MPPT using neural network [C]. 2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009: 1-5.
- [52] BONANNO F, CAPIZZI G, GRADITI G, et al. A radial basis function neural network based approach for the electrical characteristics estimation of a photovoltaic module [J]. Applied Energy, 2012, 97: 956-961.
- [53] ABDULHADI M, AL-IBRAHIM A M, VIRK G S. Neuro-fuzzy-based solar cell model [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 619-624.
- [54] AMARA K, FEKIK A, HOCINE D, et al. Improved performance of a PV solar panel with adaptive neuro fuzzy inference system ANFIS based MPPT [C]. 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2018: 1098-1101.
- [55] ZHANG Y, LI Y F. Prognostics and health management of lithium-ion battery using deep learning methods: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,

- 2022, 161: 112282.
- [56] LIU W B, WANG Z D, LIU X H, et al. A survey of deep neural network architectures and their applications [J]. *Neurocomputing*, 2017, 234: 11-26.
- [57] LIU D T, LI L Y, SONG Y CH, et al. Hybrid state of charge estimation for lithium-ion battery under dynamic operating conditions [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 110: 48-61.
- [58] CAO M D, ZHANG T, LIU Y J, et al. A Bayesian optimization hyperband-optimized incremental deep belief network for online battery behaviour modelling for a satellite simulator[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106348.
- [59] 高永成. GEO 卫星电源系统故障仿真及诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 55-80.
GAO Y CH. Research on fault simulation and diagnosis of GEO satellite power system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 55-80.
- [60] YUN S T, KONG S H. Data-driven in-orbit current and voltage prediction using Bi-LSTM for LEO satellite lithium-ion battery SOC estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(6): 5292-5306.
- [61] CATELANI M, CIANI L, FANTACCI R, et al. Remaining useful life estimation for prognostics of lithium-ion batteries based on recurrent neural network[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-11.
- [62] DHAKAL B P, MAAG A, GUNASEKERA N. Using machine learning to forecast time series in spacecrafts[C]. 2020 5th International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications (CITISIA), 2020: 1-8.
- [63] 孟婷玉. 深空探测器能源建模与仿真系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 20-55.
MENG T Y. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021: 20-55.
- [64] FAISAL M, HANNAN M A, KER P J, et al. Fuzzy-based charging - discharging controller for lithium-ion battery in microgrid applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(4): 4187-4195.
- [65] LU H C, SHIH T L. Design of DC/DC Boost converter with FNN solar cell maximum power point tracking controller[C]. 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2010: 802-807.
- [66] 史欣田, 庞景月, 张新, 等. 基于集成极限学习机的卫星大数据分析[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 81-91.
SHI X T, PANG J Y, ZHANG X, et al. Satellite big data analysis based on bagging extreme learning machine[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 81-91.
- [67] 李艳霞, 柴毅. 不平衡数据分类方法综述[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 673-688.
LI Y X, CHAI Y. Review of imbalanced data classification methods[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 673-688.
- [68] MANSOURIFAR H, CHEN L, SHI W. Virtual big data for GAN based data augmentation [C]. 2019 IEEE International Conference on Big Data, 2019: 1478-1487.
- [69] 陈俊夫, 皮德常, 张强. 一种基于迁移学习的遥测数据异常检测方法[J]. *宇航学报*, 2021, 42(4): 522-530.
CHEN J F, PI D CH, ZHANG Q. An anomaly detection method of telemetry data by means of transfer learning[J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(4): 522-530.
- [70] RAZAVI-FAR R, FARAJZADEH-ZANJANI M, SAIF M. An integrated class-imbalanced learning scheme for diagnosing bearing defects in induction motors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(6): 2758-2769.
- [71] MALDONADO S, WEBER R, FAMILI F. Feature selection for high-dimensional class-imbalanced data sets using support vector machines[J]. *Information Sciences*, 2014, 286: 228-246.
- [72] 王许煜, 胡敏, 张学阳, 等. 基于动态故障树的卫星可靠性分析[J]. *中国空间科学技术*, 2020, 40(6): 56-67.
WANG X Y, HU M, ZHANG X Y, et al. Satellite reliability analysis based on dynamic fault tree [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2020, 40(6): 56-67.
- [73] 方志刚. 复杂装备系统数字孪生[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 137-171.
FANG ZH G. Digital twin of complex equipment system[M]. Beijing: China Machine Press, 2020: 137-171.
- [74] SHEN P, CHEN Q H, ZHANG ZH L, et al. Model reconstruction for body-mounted solar arrays of satellites based on limited information[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(3): 1276-1286.

- [75] UZUN M, DEMIREZEN M U, INALHAN G. Physics guided deep learning for data-driven aircraft fuel consumption modeling [J]. *Aerospace*, 2021, 8(2): 1-19.
- [76] YU Y, YAO H P, LIU Y M. Aircraft dynamics simulation using a novel physics-based learning method[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 87: 254-264.
- [77] PENG Y, ZHANG X L, SONG Y CH, et al. A low cost flexible digital twin platform for spacecraft lithium-ion battery pack degradation assessment [C]. 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2019: 1-6.
- [78] DAIGLE M J, ROYCHOUDHURY I, BREGON A. Qualitative event-based diagnosis applied to a spacecraft electrical power distribution system [J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 38: 75-91.
- [79] KURTOGLU T, MENGSHOEL O J, POLL S. A framework for systematic benchmarking of monitoring and diagnostic systems[C]. 2008 International Conference on Prognostics and Health Management, 2008: 1-13.
- [80] 王鹏鹏, 李帆, 赵建辉. 基于 Saber-Simulink 的 PPT 卫星电源控制器联合仿真[J]. *宇航学报*, 2010, 31(12): 2818-2823.
WANG P P, LI F, ZHAO J H. Co-simulation of saber and simulink-based PPT satellite power controller [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(12): 2818-2823.
- [81] 刘丽霞. 卫星电源系统的故障仿真及诊断[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 11-63.
LIU L X. Faults simulation and diagnosis of satellite power system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 11-63.
- [82] QIAO M, ZHU L Y, LI X F, et al. Design and simulation on power supply system of SAR satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24: 45-50.
- [83] HU X G, LIANG Q. Research on digital simulation of satellite integrated electronic system [C]. 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), 2014: 112-116.
- [84] XIAO J F, ZHANG K B, ZHAO G Q, et al. Design of satellite power supply fault simulation system[C]. 2022 IEEE International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), 2022: 98-104.
- [85] 路景枫. 卫星电源分系统模拟及状态监测平台研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 8-72.
LU J F. Development of simulation and condition monitoring platform of satellite power subsystem [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 8-72.
- [86] 王坤炎. 基于 MPPT 的卫星电源半实物仿真系统开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 11-64.
WANG K Y. Development of satellite power supply hardware-in-the-loop simulation system based on MPPT[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 11-64.
- [87] LIU X J, ZHANG D L, LI A SH, et al. Study on the influence of solar array damage on satellite power system[C]. 2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), 2018: 1-5.
- [88] 李太玉, 张育林. 卫星姿控实物仿真系统中的磁线圈分析[J]. *国防科技大学学报*, 2001, 23(2): 6-11.
LI T Y, ZHANG Y L. The analysis of magnetic coils on the practicality simulation system for the satellite attitude control [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2001, 23(2): 6-11.
- [89] ESHAPPA T, RANJAN R, GHATPANDE N D. Modeling of solar array and analyze the current transient response of shunt switch voltage regulator in spacecraft power conditioning unit [J]. *Journal of Adv Comput Commun Technol*, 2015, 3: 33-39.
- [90] JIANG ZH H, DOUGAL R A, LIU SH Y. Application of VTB in design and testing of satellite electrical power systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 122(1): 95-108.
- [91] BAILEY P, HOLLANDSWORTH R, ARMANTROUT J, et al. Power sizing and power performance simulation tools for general EPS mission analyses [C]. 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, 2004: 5537.
- [92] BAILEY P, GIBBS C, HOLLANDSWORTH R, et al. Theory and application of the power tools suite (PTS) for general orbital EPS applications [C]. 3rd International Energy Conversion Engineering Conference, 2005: 5612.
- [93] BIHL T, HEIDENREICH J, ALLEN D, et al. SPECTRA: A space power system modeling and simulation tool [C]. 7th International Energy Conversion Engineering Conference, 2009: 4615.
- [94] CODETTA-RAITERI D, PORTINALE L. Dynamic bayesian networks for fault detection, identification, and recovery in autonomous spacecraft [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, 45(1): 13-24.
- [95] SONG Y CH, LIU D T, YANG CH, et al. Data-driven hybrid remaining useful life estimation approach for

- spacecraft lithium-ion battery [J]. *Microelectronics Reliability*, 2017, 75: 142-153.
- [96] ESTEVE M A, KATOEN J P, NGUYEN V Y, et al. Formal correctness, safety, dependability, and performance analysis of a satellite [C]. 2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE), 2012: 1022-1031.
- [97] 刘治钢, 夏宁, 杜青. 航天器供电系统数字伴飞技术应用研究 [J]. *航天器工程*, 2020, 29 (5): 135-141.
- LIU ZH G, XIA N, DU Q. Application research of spacecraft electrical power system digital accompanying flight technology [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(5): 135-141.
- [98] SUN B, JIN W H, LI ZH D, et al. A review of fault detection and diagnosis of satellite power subsystem [C]. 11th EAI International Conference on Wireless and Satellite Systems (WiSATS), Nanjing, China: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021: 164-174.
- [99] IBRAHIM S K, AHMED A, ZEIDAN M A E, et al. Machine learning methods for spacecraft telemetry mining [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(4): 1816-1827.
- [100] WANG ZH Q, LIU N, GUO Y M. Adaptive sliding window LSTM NN based RUL prediction for lithium-ion batteries integrating LTSA feature reconstruction [J]. *Neurocomputing*, 2021, 466: 178-189.
- [101] XU X, CHEN N. A state-space-based prognostics model for lithium-ion battery degradation [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 159: 47-57.
- [102] PAN D W, LIU D T, ZHOU J, et al. Anomaly detection for satellite power subsystem with associated rules based on Kernel Principal Component Analysis [J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55(9): 2082-2086.
- [103] WANG G H, LI Q, SUN J L, et al. Telemetry data processing flow model: A case study [J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 2015, 87(1): 52-58.
- [104] BISWAS G, KHORASGANI H, STANJE G, et al. An approach to mode and anomaly detection with spacecraft telemetry data [J]. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 2016, 7(4): 4-15.
- [105] 董静怡, 庞景月, 彭宇, 等. 集成 LSTM 的航天器遥测数据异常检测方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 22-29.
- DONG J Y, PANG J Y, PENG Y, et al. Spacecraft telemetry data anomaly detection method based on ensemble LSTM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 22-29.
- [106] NASA N. NASA technology roadmaps TA 3: Space power and energy storage [R]. *NASA Technol, Roadmaps*, 2020: 117-121, 158-165.
- [107] WANG Y, ZHANG T, HUI J J, et al. An anomaly detection method for spacecraft solar arrays based on the ILS-SVM model [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2023: 1-15.
- [108] 秦剑华, 王莉. 基于变权重主元分析的航天电源系统诊断方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 15-23.
- QIN J H, WANG L. Research on diagnostic method of spacecraft electrical power system based on variable weight hierarchical principal component analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 15-23.
- [109] SUO M L, TAO L F, ZHU B L, et al. Soft decision-making based on decision-theoretic rough set and Takagi-Sugeno fuzzy model with application to the autonomous fault diagnosis of satellite power system [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 106: 106108.
- [110] SUO M L, ZHU B L, ZHOU D, et al. Neighborhood grid clustering and its application in fault diagnosis of satellite power system [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 233(4): 1270-1283.
- [111] ZHANG SH G, WANG L, LIU Y, et al. Real time fault diagnosis with tests of uncertain quality for multimode systems and its application in a satellite power system [J]. *Journal of Electronic Testing*, 2018, 34(5): 529-545.
- [112] SMART M C, RATNAKUMAR B V, WHITCANACK L D, et al. Life verification of large capacity Yardney Li-ion cells and batteries in support of NASA missions [J]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 34(2): 116-132.
- [113] JIN G, MATTHEWS D E, ZHOU ZH B. A Bayesian framework for on-line degradation assessment and residual life prediction of secondary batteries in spacecraft [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 113: 7-20.
- [114] 周建宝, 王少军, 马丽萍, 等. 可重构卫星锂离子电池剩余寿命预测系统研究 [J]. *仪器仪表学报*,

- 2013, 34(9): 2034-2044.
- ZHOU J B, WANG SH J, MA L P, et al. Study on the reconfigurable remaining useful life estimation system for satellite lithium-ion battery [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2034-2044.
- [115] 王竹晴, 郭阳明, 徐聪. 基于SAE-VMD的锂离子电池健康因子提取方法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 814-821.
- WANG ZH Q, GUO Y M, XU C. An HI extraction framework for lithium-ion battery prognostics based on SAE-VMD[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(4): 814-821.
- [116] SOON J J, CHIA J W, AUNG H, et al. A photovoltaic model based method to monitor solar array degradation on-board a microsatellite [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(5): 2537-2546.
- [117] MENG J R, FENG J, SUN Q, et al. Degradation model of the orbiting current for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells used on satellite[J]. Solar Energy, 2015, 122: 464-471.
- [118] ZHANG Y, JIA X, GUO B. Bayesian framework for satellite rechargeable lithium battery synthesizing bivariate degradation and lifetime data[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2): 418-431.
- [119] LIU D T, ZHOU J B, LIAO H T, et al. A health indicator extraction and optimization framework for lithium-ion battery degradation modeling and prognostics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(6): 915-928.
- [120] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.
- PENG Y, LIU D T. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 481-495.
- [121] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1): 1-9.
- PENG Y, LIU D T, PENG X Y. A review: Prognostics and health management [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 1-9.
- [122] 张月梅. 航天器电源系统的健康评估与剩余寿命预测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- ZHANG Y M. Research on health status assessment and remaining life prediction for spacecraft power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [123] GUO W M, LI W P, PAN Y H, et al. Research on battery performance assessment technology by artificial neural network and intelligent computing [C]. 2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICESIT), 2021: 589-592.

作者简介



赵光权, 分别在2002年和2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为哈尔滨工业大学副教授, 主要研究方向为航天器测试与仿真、航天器健康管理。

E-mail: hit53zhao@hit.edu.cn

Zhao Guangquan received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 2002 and 2007, respectively. He is currently an associate professor at Harbin Institute of Technology. His main research interests include spacecraft test and simulation, and spacecraft health management.



王盟(通信作者), 分别在2017年和2020年于哈尔滨理工大学获得学士学位和硕士学位, 现为哈尔滨工业大学电子与信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为航天器电源的建模仿真、健康管理。

E-mail: wangm@hit.edu.cn

Wang Meng (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Harbin University of Science and Technology in 2017 and 2020, respectively. He is currently a Ph. D. candidate in the School of Electronics and Information Engineering at Harbin Institute of Technology. His main research interests include modeling, simulation, and health management of spacecraft power supply.